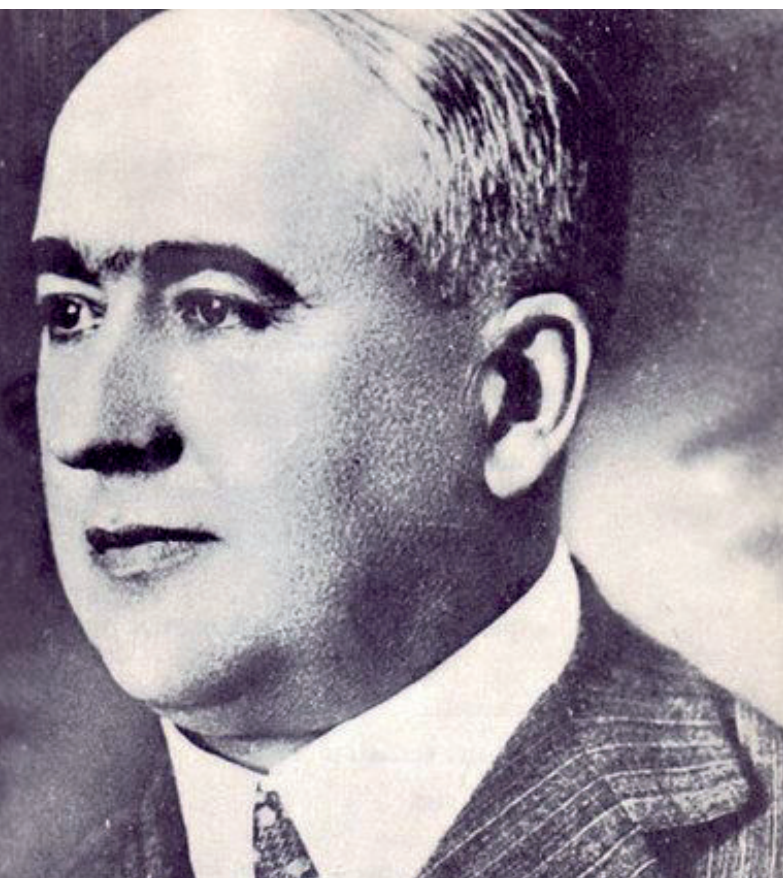


MIKOR KELETKEZNEK KLÍMAKILENGÉSEK?

Titokfejtők

Száz éve (1920. augusztus 7-én) jelent meg egy az éghajlatkutatást matematikailag megalapozó mű. A szerző, Milutin Milanković szerb kutató eredményeinek későbbi pontosítója és továbbfejlesztője, Bacsák György (Pozsony, 1870. június 5. – Fonyód, 1920. március 4.) pedig 150 éve született, és száz éves korában, kerek fél évszázada hunyt el. A jégkorszakok titkait feltáró kutatások körülményei nem mindennapiak, az eredmények pedig a globális természeti környezetet meghatározó jelentőségűek.



Hihetetlen történet

A napsugárzás által okozott hőtani jelenségek matematikai elmélete Budapesten, a Magyar Tudományos Akadémia könyvtárában, különleges körülmények között fogalmazódott meg. Szerzője, Milutin Milanković (külföldön általában Milankovitch, horvátországi születésű szerb kutató) 1912-től kezdve foglalkozott e témával, de a Nagy Háború kitörése után az Osztrák-Magyar Monarchia hatóságai szülőfalujában (Dályán, Dalj) letartóztatták. Szakmai kapcsolatai révén azonban Budapestre kerülhetett, ahol az MTA Könyvtára a világháború négy évén át ideális munkafeltételeket biztosított számára. A könyv [1] megjelenése azért csúszott 2020-ra, mert először a győztesek nyelvén (franciául) kellett megjelentetni (1. ábra). A bevezetőben Milankovics így emlékezik meg a budapesti évekről:

„A világháború kitörése brutálisan megszakította kutatásaimat: osztrák-magyar hadifogoly lettem. 1914 végén aztán elhagyhattam az internálótábort és letelepedhettem Budapesten, ahol a következő három éven át élveztem a Magyar Tudományos Akadémia vendégszeretét, így be tudtam fejezni a korábban elkezdett munkát.”

Szerb nyelven megírt önéletrajzi visszaemlékezésében [2] élete boldog időszakaként gondol vissza 1914-1918 közötti budapesti éveire:

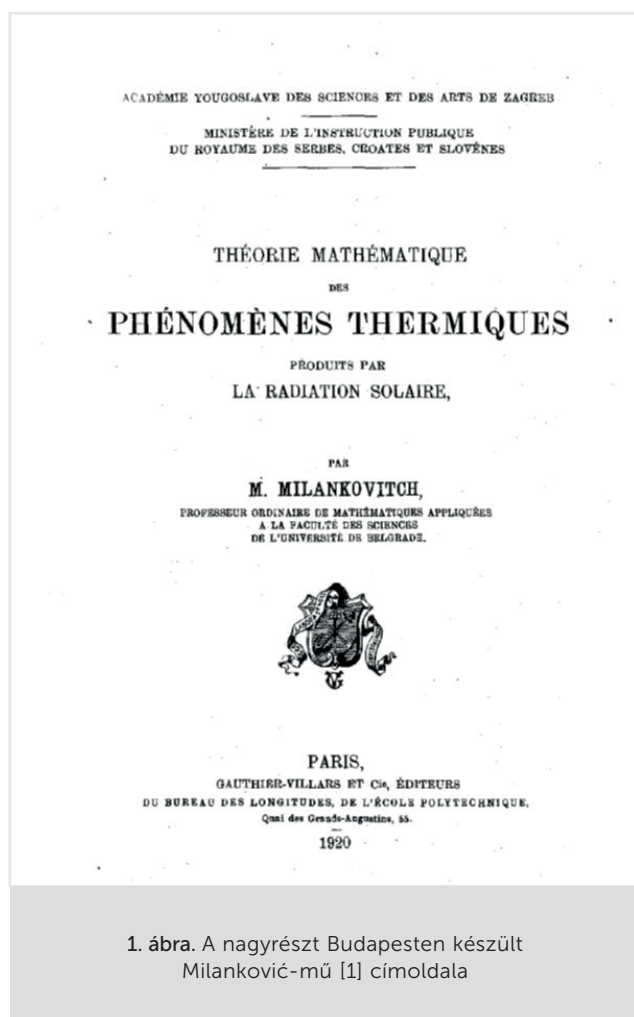
„Már pesti tartózkodásom első napjaiban elmentem a Magyar Tudományos Akadémiára. A Duna pesti oldalán, a vén Lánchíd tőszomszédságában áll a tudomány e szentélye. E magasztos cél szolgálatáról tanúskodik már maga az épület is: impozáns külső megjelenésével, harmonikus arányaival, szobraival...

Mint a zárandok, aki lelkét és az igazságba vetett hitét kívánja megerősíteni, úgy léptem e szentélybe. Bejelentetek az akadémiai könyvtár igazgatójának, a műegyetem korábbi professzorának, aki egy ősz matematikus: Szily Kálmán volt.

»Kedves Milutin« — szólalt meg — »ön a belgrádi egyetem professzora. Bogdan Gavrilović kollégája, aki tanítványom volt, s akit saját fiamként szerettem.« S elmesélte emlékeit Bogdanról és együttműködéséről a Szerb Királyi Akadémiával, amelynek „értésítőjében” [a Glas című folyóiratban] egy matematikai értekezése is megjelent, Bogdan fordításában. Hosszúra nyúlt baráti beszélgetésünkben elmondtam, hogy mit szeretnék.

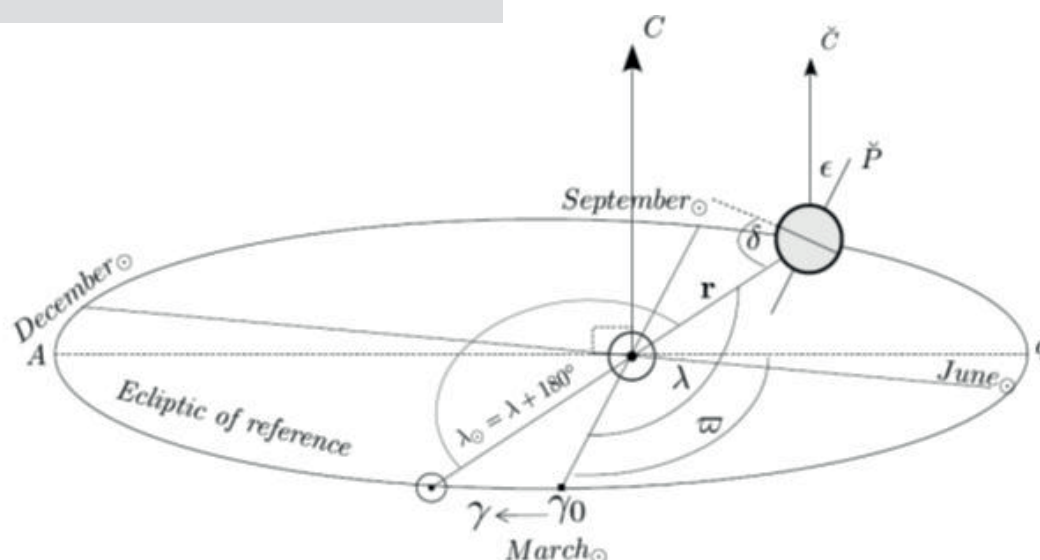
»Könyvtárunk olvasóterme« — mondta — »csak délig áll nyitva az olvasóközönség előtt, de önnek bármедdig.« Majd behívatta a könyvtár két munkatársát és velük is közölte ezt. Még egy ideig beszélgettünk, majd miután elköszöntünk, kiléptem az utcára, és felsőhajtottam: végre találtam munkahelyet a kutatómunkámhoz.

Naponta bejártam az Akadémiára, többnyire délig. Mindkét könyvtári munkatárs barátságosan fogadott és bevezettek a tágas olvasóterembe, amely üres volt, de jól fűtött. Leültem egy helyre, ahonnan az ablakból kilátás nyílt Budára és az alatt hömpölygő Dunára. Valahányszor felnéztem a munkámból, mindannyiszor felüldített ez a látvány. Ilyen hangulat mellett jól haladtam a munkámmal. Magammal hoztam a legfontosabb szakirodalmat, amely az engem foglalkoztató kérdéshez kapcsolódott. Minden további irodalmat pedig megtaláltam az Akadémia könyvtárában vagy a központi meteorológiai intézetben [Meteorológiai és Földmágnesezési Magyar



1. ábra. A nagyrészt Budapesten készült Milanković-mű [1] címoldala

2. ábra. A keringő Föld, a jelenlegi földpálya, fókuszában a Nappal
(Részletek: Cionco és Soon (2017), [9])



Királyi Központi Intézet]. Ez az intézet külön épületben volt, egy budai dombon. Szily Kálmán ajánlásával érkeztem oda, ahol az intézet vezetője, Róna Zsigmond barátságosan fogadott. Ennek hála, a munkám elkészítéséhez 144 tételből álló irodalmat állítottam össze. [...]

Az élvezetes munka és a kellemes hangulat mellett gyorsan teltek a napok, s hogy Tinkának (a feleség) némi örömet és szórakozást nyújtsak, elmentünk a pesti Operába. Itt nem akadályozott a különös magyar nyelv, amely számunkra ellehetetlenítette a színházlátogatást. A magyar nagyon muzikális nemzet, s a legfelső állami vezetésük mindig nagyon bőkezű volt, amikor zenéről volt szó. A pesti Operának szép az épülete, jó a zenekara és kiválóak az énekesei [...]

Pesti tartózkodásunk első időszaka úgy tűnt számunkra – mindazok után, amin keresztülmentünk –, mint egy megkéssett nászút, s arról, hogy valóban az volt, megbizonyosodhattunk, amikor észleltük Tinkánál a reggeli rosszulléteket és mindazon jeleket, amelyek az áldott állapot velejárói. Család nélkül magányosnak éreztük magunkat idegenben, ezért, hogy ezt enyhítsük, meghívtuk Dankát. Megírtam a kérvényt, hogy engedélyezzék részére a beutazást Magyarországra, s átadtam a rendőrkapitányságon, ahol barátságosak voltak velem. Javasolták a kérvény elfogadását, így rövid idő múlva a kezemben volt az engedély.” (Hornyák Árpád fordítása alapján, 2017)

A hihetetlen, de igaz történetnek 2017-től az MTA Könyvtár olvasótermében emléktábla állít emléket. A tudománytörténeti munkák egy része Milankovícal egyezően, pontosan adja vissza a budapesti évek hangulatát és jelentőségét:

„Bármennyire is valószínűtlen, a jégkorszakok megértésében az egyik legfontosabb történet a Magyar Tudományos Akadémia budapesti könyvtárához fűződik.

Itt volt I. háborús internált Milutin Milanković. [...] Budapestre kerülve, besétált a Magyar Tudományos Akadémia székházába, ahol könyvtárigazgató, Szily Kálmán matematikus részéről meleg fogadtatásban részesült. Milanković a következő négy évet a könyvtár olvasótermében töltötte, ahol olyan matematikai modellen dolgozott, amely a változó tengelyferdeségű és változó elliptikus pályájú bolygók éghajlatát írta le. Bizonyos időközönként berendelték a rendőrségre, hogy ellenőrizték, nem szökött-e meg.” [3]

Pontosítások, érdemek

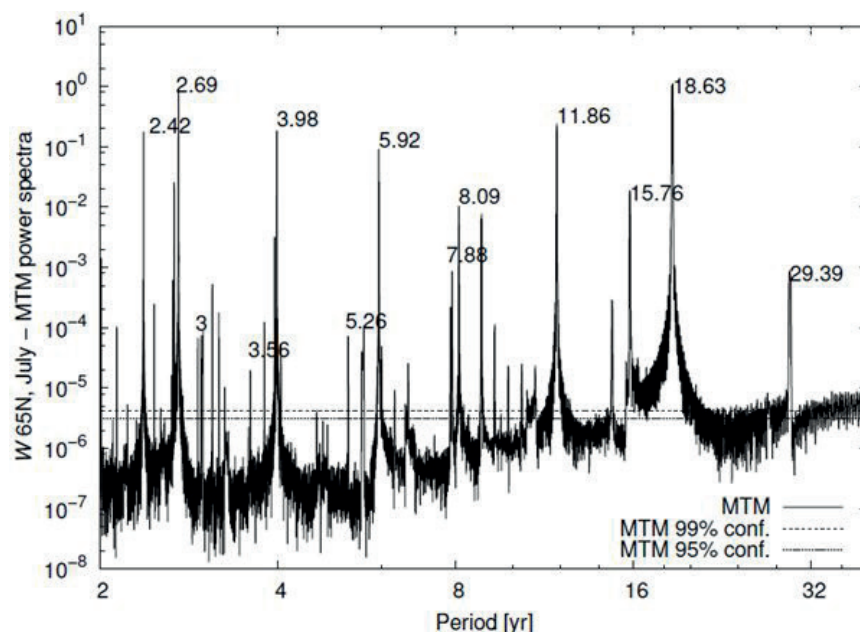
A földpálya elnyúltsága (ellipticitása), a Föld forgástengelyének ferdesége (obliquitása) és a forgástengely körkörös imbolgása (precessziója) az éghajlat hosszú távú (100, 41, és 23 ezer éves) változása közötti kapcsolat matematikai kifejtéséről szóló könyv felkeltette Wladimir Köppen (a földtörténeti negyedkor éghajlatváltozásainak felfedezője) és veje, Alfred Wegener (a kontinensvándorlás kigondolója) érdeklődését. Élénk együttműködés kezdődött hármójuk között. Wegener hatására Milanković a kontinensvándorlással is foglalkozni kezdett. Bacsák György 1933 táján

3. ábra. Július közepi adatokra számított besugárzási változások MTM (multitaper) módszerrel kapott spektruma a 2 év és 40 év közötti periódusstartományban, a 65. szélességi kör mentén. (Részletek: Cionco és Soon (2017), [9])

találkozott a szerb kutató németül írt egyik munkájával, és abban mindenkinél jobban elmélyedt, majd levelezés kezdődött Bacsák és Milanković között. Bacsák a saját eredményeivel kiegészített Milanković-elméletről 1939 és 1944 között hét publikációt írt részben németül, egyet franciául is. Néhány [4, 5, 6] újabban interneten is hozzáférhető. 1940-ben így írt [4]: „Milankovitch elődei azért tudta messze túlhaladni, mert a klímakilengések nehéz kérdését egy ügyes fogással ketté osztotta, s külön-külön birkózott meg a felére csökkentett nehézséggel. Milankovitch tudniillik először a Napból eredő hőnek azokat az ingadozásait tette számítása tárgyává, amelyek a légkör legfelső felületén állnak elő, vagy más szóval azt a fiktív klímát vizsgálta, amely a diluvium alatt a légkör nélküli Földön uralkodott volna. A visszatérés a fiktív klímából a valóságba nem könnyű dolog, de könyvének II. része ezt a nehéz feladatot is szabatosan megoldotta s azzal

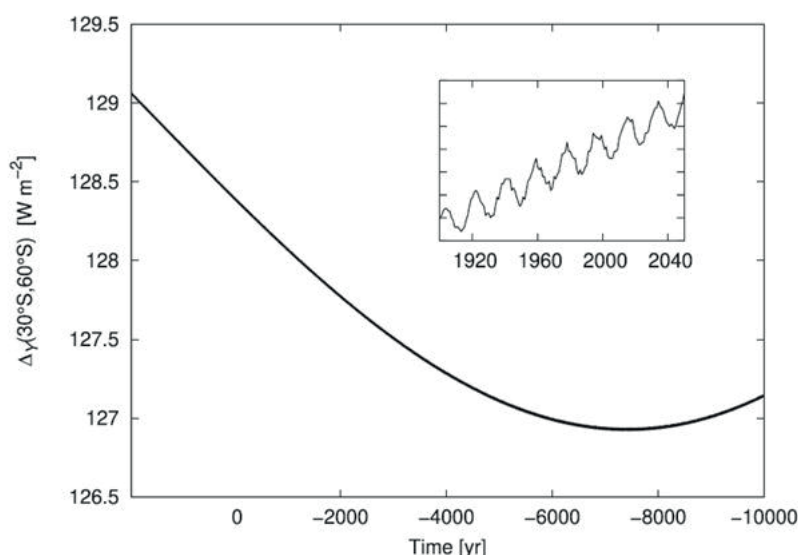
a megnyugtató eredménnyel zárult, hogy bátran használhatjuk a fiktív klíma ingadozására levezetett törvényeket, mert csak az amplitúdókban lesz változás. A valóságban itt a légtenger fenekén, a bioszférában, a kilengések körülbelül a felére mérséklődnek, de az időpontok nem változnak s az egyes kilengések időtartama is azonos marad.”

Milanković 1941-es összefoglaló művében [7] három helyen is említi Bacsák hozzájárulását: az angol változat 371. és az 512. oldalán elírások és számítási hibák kijavításáért mond köszönetet, az 557-558. oldalon pedig a következő szavakkal foglalja össze érdemeit: „Bacsák határozottan fellépett elméletem téves értelmezése ellen. Intenzíven és sikerrel tanulmányozta sugárzási görbéimet, és érthetővé tette az elméletemet még a nem matematikusok számára is. Nagybbr figyelmet fordított az interglaciális periódusokra, mint amennyire én tettem. A sugárzási görbe változásaiból eredő jégkorszak két



összetevőjének használatával, a hűvös és meleg nyarak, az enyhe és hideg telek jellemzésével különbséget tett glaciális és antiglaciális, szubtrópusi és szubarktikus időszakok között. Osztályozása mélyebb betekintést tett lehetővé a földtörténeti negyedidőszak interglaciális időszakainak éghajlatába.”

Bacsák György 1954-es *A pliocén és a pleisztocén az égi mechanika megvilágításában* című összefoglaló munkáját (84, azaz nyolcvannégy éves korában megvédett kandidátusi értekezését, amely alapján egyből akadémiai doktori címet kapott) annak idején az Akadémiai Kiadó és a Földtani közlöny is leközlölte. 2020-ban az MTA Könyvtár és Információs Központ REAL repozitóriumban az eredeti kéziratot is elérhetővé tette [8].



4. ábra. A besugárzás 30. és 60. földrajzi szélesség közötti különbségének éves értéke -10000 évtől +4000 évig. A 150 éves időszakot mutató kis diagram energiasűrűségben 129,04 W/m²-től és 129,11 W/m²-ig tart. (Részletek: Cionco et al. (2020), [10])

Milankovičot mondják a csillagászati eredetű éghajlatváltozások felfedezőjének. Ami így nem igaz, hiszen ez a klímaformáló erőhatás addigra már sokak (Adhémar, Délambre, Franceur, Humboldt, d'Alembert, Croll, Herschel, le Verrier, Meech, Darwin, Legendre, A. Geikie, J. Geikie, Laplace, Poisson, Howorth, Wiener, de Geer, Stockwell, Gaar, Culverwell, King, Lyell, Hargreaves, Ekholm, Spitaler, Hopfner, Pilgrim) közreműködése révén elég egyértelműen kirajzolódott. Milankovič volt azonban az, aki a témáról kellő matematikai részletességű, átfogó művet írt (minden bizonnyal az 1914-1918 közötti ideális budapesti munkafeltételeknek is köszönhetően). És ő vette észre, hogy az északi és a déli félgömbök szélességi öveinek téli és nyári besugárzásában keletkező változásokra kell elsősorban figyelni. Bacsák magyarázata [4] szerint: „Az egész Föld egész évi besugárzása csillagászatilag mindig egyforma; csakis az egyes földövek és a nyári meg a téli félévi besugárzásban vannak szekuláris változások, az egyik öv nyer, vagy veszít a másikkal szemben s az egyik félév nyer, vagy veszít a másikkal szemben. Ha ez a kétféle nyereség, vagy veszteség időbelileg összetalálkozik, akkor keletkeznek klímakilengések.”

Milankovičnak volt egy harmadik érdeme is, de erről szokott a legkevesebb szó esni. Amint Bacsák

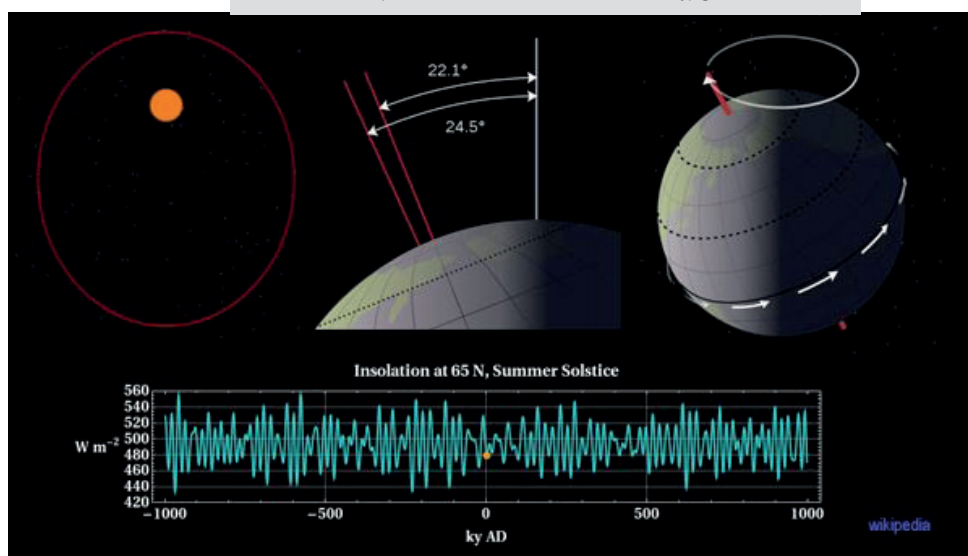
bemutatásából kiviláglik, a kor ismereteit egybefoglaló légkörfizikai levezetéseket végzett. Arrhenius és de Marchi nyomán külön kitért a vízgőz és a szén-dioxid hőelnyelő hatására, velük ellentétes következtetésre jutva.

Mai jelentőség

Az elméletet csak a hetvenes évek második felétől kezdték elismerni (zavartalan mélytengeri üledéksoroknak és azok pontos kormeghatározásának köszönhetően). Ha Bacsák György tanulmánya a megjelenésekor nagyobb publicitást kap, a félreértések egy része talán megelőzhető lett volna. (Bacsák György munkáinak angol kiadása ma is nagyon időszerű lenne!)

A félreértelmezések ma is mindennapok: a Milankovič(–Bacsák)-elméletben sokan a természeti eredetű éghajlatváltozások lassúságát látják igazolni. Ami pedig okafogyott érvelés. A számítástechnika fejlődésének – és Milankovič–Bacsák szellemi örököseinek – köszönhetően bizonyosságot nyert, hogy a földpálya elemeinek (2. ábra, [10]) rövid periódusidejű (évszázados, évtizedes, néhány éves, sőt akár egy éven belüli) változásai is vannak, egyértelmű besugárzás-változási (*Short Term Orbital Forcing, STOF*) következményekkel [9]. A 3. ábra eredményeiben figyelembe vették többek között a nutáció (azaz a precesszióra ráakódott luniszoláris hullámzás), a 235 hónapos

5. ábra. Fent: A földpálya elnyúltságának (ellipticitás), a forgástengely ferdeségének (obliquitás) és a forgástengely körkörös imbolygásának (precesszió) illusztrációja. Lent: A 65. északi szélességre számított napenergia-besugárzás a légkör tetején, időszámításunk szerint (A.D.) mínusz egymillió évtől plusz egymillió évig. (Forrás: <https://149366104.v2.pressablecdn.com/wp-content/uploads/2015/03/milankovitch1.jpg>)



Metón-ciklus, valamint a Jupiter és a Naprendszer többi tagja hatását. A Bacsák-féle gondolatmenetnek megfelelő földrajzi szélességi besugárzási gradiensben (*Latitudinal Insolation Gradient, LIG*) gazdag időbeli változásokat tapasztaltak (4. ábra). Két argentin és egy USA-beli kutató 2020 júniusában megjelent publikációja [10] a LIG képében egy örökös klímamódosító hajtóerőt állít elénk. Ez bizonyítottan létezik, úgyhogy a forró vitapontok a jövőben a klímarendszer további — kevéssé ismert — hatótényezői köré kell, hogy csoportosuljanak. Kapcsolódó, de igen kényes kérdés például, hogy a Naprendszer tagjainak helyzete befolyásolja-e a naptevékenységet, illetve a Nap–Föld kölcsönhatásokat. Úgy tűnik, hogy a gravitáción túlmenően elektromágneses jelenségekkel és csatolásokkal is számolni kell. Sokadszor bizonyosodhat be, hogy a természet fantáziája dúsabb, mint az emberé. A jövő titokfejtői — az űridőjárás földi hatásainak kutatói, közöttük magyarok — csendben, de szorgosan dolgoznak.

SZARKA LÁSZLÓ CSABA

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki Slobodan Markovićnak (Újvidék) és Bordás Árpádnak (Zenta) a Milanković-kötetekért [1, 8], Hornyák Árpádnak (Pécs) a 2017. évi emléktábla-avatást megelőzően készített Milanković-önéletrajz [2] budapesti vonatkozásainak lefordításáért.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Milankovitch M (1920): Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. Gauthiers-Villars, Paris. Németül: Mathematische Theorie der durch Sonnenstrahlung Wärmephänomene, Bulletin des travaux de l'Académie des Sciences de Zagreb. (Cím magyarul: A napsugárzás által okozott hőtani jelenségek matematikai elmélete).
- [2] Milanković M (1952): Uspomene, doživljaji i saznanja iz godina 1909. do 1944 / Успомене, доживљаји и сазнања из година 1909 до 1944. Naučna knjiga, Beograd. (Cím magyarul: Emlékek, tapasztalatok és ismeretek az 1909 és 1944 közötti időszakból)
- [3] Calvin W H (1991): The Ascent of Mind: Ice Age Climates and the Evolution of Intelligence, New York, Bantam Books. (Cím magyarul: Az elme felemelkedése: A jégkorszak éghajlata és az intelligencia evolúciója)
- [4] Bacsák Gy (1940): Az interglaciális korszakok értelmezése. (Zur Erklärung der Interglazialzeiten). Az Időjárás, 16 (I. rész: 1-2. szám, 8-16, németül: 43-50, II. rész: 3-4. szám 62-69, németül: 98-101, III. rész: 5-6. szám, 105-108, németül: 143-145. http://real-j.mtak.hu/9123/1/Idojaras_1940.pdf)
- [5] Bacsák Gy (1942): A Milankovitch-elmélet ellen emelt kifogásokról. Csillagászati Lapok, 5, 3, 117-125, http://real-j.mtak.hu/6790/1/MTA_CsillagaszatiLap_05_01-04.pdf
- [6] Bacsák Gy (1944): Az utolsó 600.000 év földtörténete. A M. Kir. Földtani Intézet 1943. évi jelentésének függeléke. Beszámoló a M. Kir. Földtani Intézet vitaüléseinek munkálatairól, VI. évfolyam, 5, Budapest. http://epa.oszk.hu/03600/03638/00027/pdf/EPA03638_mafi_beszamol_1944_05.pdf
- [7] Milankovitch M (1941): Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Académie royale serbe. Éditions speciales; 132 [vielm. 133]: XX, 633, Belgrad. Angol kiadások: Canon of Insolation and the Ice-Age Problem, Israel Program for Scientific Translations, trans., US Department of Commerce and NSF (1969) és Zavod za Udžbenike i Nastavna Sredstva, Beograd, 1998. (Cím magyarul: A Föld napfénybesugárzásának kánonja és a jégkorszak-probléma)
- [8] Bacsák Gy (1955): A pliocén és a pleisztocén az égi mechanika megvilágításában. Földtani Közöny 85, 70- 105. <http://docplayer.hu/117972690-A-pliocen-es-a-pleisztocen-az-egi-mechanika-megvilagitasaban.html>. Eredeti kézirat: http://real-d.mtak.hu/1245/1/Bacs%C3%A1k_Plioc%C3%A9n.pdf
- [9] Cionco R G, Soon W W-H (2017): Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling. Earth-Science Reviews 166, 206-222. <https://arxiv.org/pdf/1612.08380.pdf> (Cím magyarul: Rövid távú orbitális erőhatás: az klímamodellezés reális határfeltételeinek közelítő áttekintése és újraértékelése).
- [10] Cionco R G, Soon W W-H, Quaranta N E (2020): On the calculation of latitudinal insolation gradients throughout the Holocene. Advances in Space Research 66, 3, 720-742. (Cím magyarul: A szélességi besugárzási gradiensek kiszámításáról a holocén teljes időtartományában)

